

ESTUDO DA INJEÇÃO DE MISTURAS DE CASCA DE EUCALIPTO COM CARVÃO MINERAL EM ALTO-FORNO

Ricardo dos Santos Oliveira ¹
Carlos Frederico Campos de Assis ²
Paulo Santos Assis ^{1,3}

Resumo

A siderurgia tem uma importante participação na geração de gases do efeito estufa devido ao alto consumo de carvão e coque no balanço energético. A injeção de carvão pulverizado no alto-forno pode ser uma alternativa para diminuir este efeito, utilizando biomassas que são fonte renovável e através da fotossíntese captura o gás CO₂ da atmosfera, reduzindo a poluição causada pelos altos-fornos. A casca do eucalipto é rica em carbono e complementa a oferta desse elemento para o processo de redução do minério de ferro. Este trabalho teve como objetivo estudar a inserção de casca de eucalipto para a injeção nas ventaneiras de altos-fornos. Para simular a possibilidade de injetar materiais, uma modelagem física é usada, a qual foi desenvolvida para este fim. Outras técnicas são utilizadas para caracterizar os materiais, como classificação granulométrica, combustão, calorimetria, análise de gás, análise química imediata e elementar. Assim, em teoria, o que esta pesquisa mostra é que a casca de eucalipto pode ser injetada em altos-fornos no lugar do carvão pulverizado.

Palavras-chave: Injeção de carvão pulverizado; Alto-forno; Casca de eucalipto; Carvão mineral.

STUDY OF BARK OF EUCALYPTUS MIXTURES WITH COAL INJECTION IN BLAST FURNACE

Abstract

The steel industry has an important participation in the generation of greenhouse gases due to the high consumption of coal and coke in the energy balance. The pulverized coal injection in the blast furnace can be an alternative to reduce this effect by using biomass which are renewable source and through photosynthesis captures the CO₂ gas from the atmosphere, reducing the pollution caused by the blast furnaces. The bark of eucalyptus is rich in carbon and complements the provision of that element to the process of iron ore reduction. This work aimed to study the bark of eucalyptus insert for injection in blast furnace tuyeres. To simulate the possibility of injection material, a physical modeling is used, which has been developed for this purpose. Other techniques are used to characterize the materials as size classification, combustion, calorimetry, gas analysis, immediate chemical and elemental analysis. So, in theory, this research attempts to shows that barks of eucalyptus can be injected into blast furnaces in place of the pulverized coal.

Keywords: Pulverized coal injection; Blast furnace; Bark of eucalyptus; Coal.

1 INTRODUÇÃO

Devido às atividades humanas, a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera tem aumentado consideravelmente nos últimos anos, agravando o efeito estufa e contribuindo para o aquecimento global. Essas ações estão ligadas principalmente à queima de combustíveis fósseis. Para combater esses problemas ambientais, entrou em vigor, em 2005, o Protocolo de Quioto. O objetivo do

protocolo é, de forma simplificada, limitar as emissões de gases do efeito estufa e também estabelecer uma proposta de desenvolvimento para a sustentabilidade dos recursos naturais [1-3].

Dentre as medidas adotadas para reduzir o consumo de energia destaca a injeção de carvão pulverizado (PCI) em altos-fornos, que têm como objetivo reduzir o consumo de

¹ Rede Temática em Engenharia de Materiais, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.
E-mail: ricardosanoliveira@hotmail.com

² Departamento Metalurgia e Química, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Timóteo, MG, Brasil.

³ EcoEnviroX, Ouro Preto, MG, Brasil.



coque ou carvão vegetal [4]; além de auxiliar no aumento da produtividade e redução de custos de produção, principalmente quando são utilizados certos tipos de biomassa, levando em conta as condições restritivas e parâmetros operacionais do alto-forno [5,6]. A injeção de carvão pulverizado é uma realidade siderúrgica e pode ser encontrada em alguns setores taxas de injeção da ordem de até 200 kg/t de gusa [5,7,8].

A casca de eucalipto é um dos principais resíduos sólidos gerados pela produção de celulose. Logo, o uso deste resíduo no processo de injeção implicaria na redução do consumo de carvão mineral, oferecendo uma maior sustentabilidade econômica e ambiental na produção de ferro-gusa. Além disso, ele pode combinar técnicas de reflorestamento para sequestro de carbono e oxigênio devido à regeneração de práticas florestais realizadas pelas fábricas de celulose, onde o acúmulo de carbono fixo por hectare de eucalipto é de 10 toneladas [9].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho estudou-se o comportamento de mistura de carvão mineral e casca de eucalipto pulverizado para injeção em altos-fornos, inclusive os de pequeno porte com volume útil menor que 300m³, considerando as condições restritivas reinantes nestes reatores.

Inicialmente as amostras passaram por um ensaio de granulometria com o objetivo de classificar todo material de granulometria entre 0,075mm (200#) e 0,150mm (100#). Em seguida as amostras passaram pela estufa a fim de minimizar a umidade do material (abaixo de 5%). As misturas entre carvão mineral e casca de eucalipto são de 25%, 50% e 75%, para uma taxa de injeção de 50 kg/t gusa, 100 kg/ t gusa e 150 kg/t gusa.

Uma vez preparadas, as amostras foram submetidas à análise química imediata utilizando adaptações da EN 14774, EN 14775 e EN 15148 [10-12]. A análise química elementar foi levada a cabo usando uma adaptação da norma EN 15104 [13] e EN 15289 [14,15], o poder calorífico foi analisado usando a norma EN 14918 [16] e as amostras seguiram para o Simulador de Injeção de Materiais Pulverizados em Altos-Fornos, ensaio realizado no Laboratório de Siderurgia da Escola de Minas / UFOP. O equipamento, mostrado na Figura 1, simula as condições existentes na injeção de materiais pulverizados em ventaneiras de altos-fornos, a fim de se determinar o índice de combustão do material em questão. Dessas condições podemos destacar:

- Baixo tempo de residência da partícula no jato de gás na zona de combustão do alto-forno. Este tempo é da ordem de 20 à 50ms (= 0,02 a 0,05s);
- Elevado gradiente térmico que o material pulverizado sofre quando é injetado nas ventaneiras. Este valor é da ordem de 10⁵ K/s.

O equipamento utiliza dois fornos:

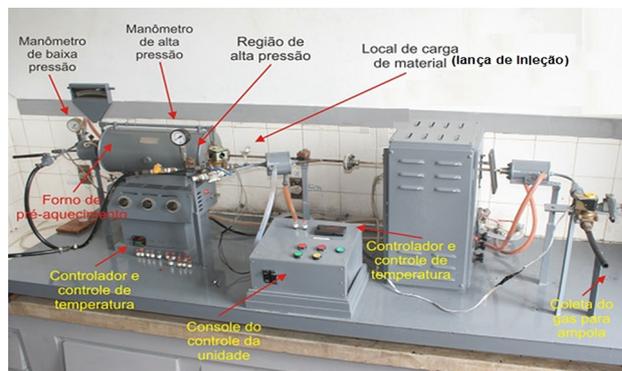


Figura 1. Simulador de Injeção de Materiais Pulverizados em Altos-Fornos [17].

- Um forno de pré-aquecimento: forno do tipo Kanthal operado com uma variação de temperatura de 0 a 1250 °C. A temperatura do forno é monitorada por um controlador digital de temperatura, ativado por um termopar. A câmara de reação do forno é composta por um tubo de aproximadamente 41,5cm de comprimento e 7,5cm de diâmetro, sendo esta de aço inoxidável. O objetivo principal deste forno é fornecer calor ao oxigênio (em torno de 1000 °C) simulando a temperatura de sopro do alto-forno.
- Um forno que simula a zona de combustão capaz de operar a temperaturas acima de 1500 °C, sendo monitorado por um controlador digital de temperatura ativado por um termopar. A finalidade deste forno é simular as características da zona de combustão de um alto-forno.

Próximo à entrada do forno de pré-aquecimento existe um manômetro para ajustar e monitorar a pressão do gás, logo após este, existe um dispositivo de resfriamento operado com água para assegurar que o calor de dentro do forno de pré-aquecimento não seja conduzido ao gás antes dele chegar ao interior deste. Os dois fornos e a lança de injeção são interligados por tubos de aço inoxidável, sendo que no interior do forno de combustão existe um tubo de quartzo para resistir às altas temperaturas atingidas no interior deste. No fim do tubo do forno de combustão existe um filtro para remover a parcela do material não queimado e encaminhar o gás para a válvula eletromagnética a qual emite um pulso que encaminha o gás para ser coletado em uma ampola de vidro e depois segue para posterior análise no ORSAT, mostrado na Figura 2. O equipamento ORSAT trata-se de um conjunto de ampolas de vidro contendo um seu interior soluções necessárias para a captura do gás. Este sistema é interligado por tubos de vidro por onde o gás é forçado a passar, gerando assim, uma leitura no teor de CO, CO₂, O₂ e CH₄. As soluções utilizadas são de cloreto cúprico para o CO, hidróxido de potássio para o CO₂, pirogalol para o O₂ e cloreto de sódio para o CH₄.

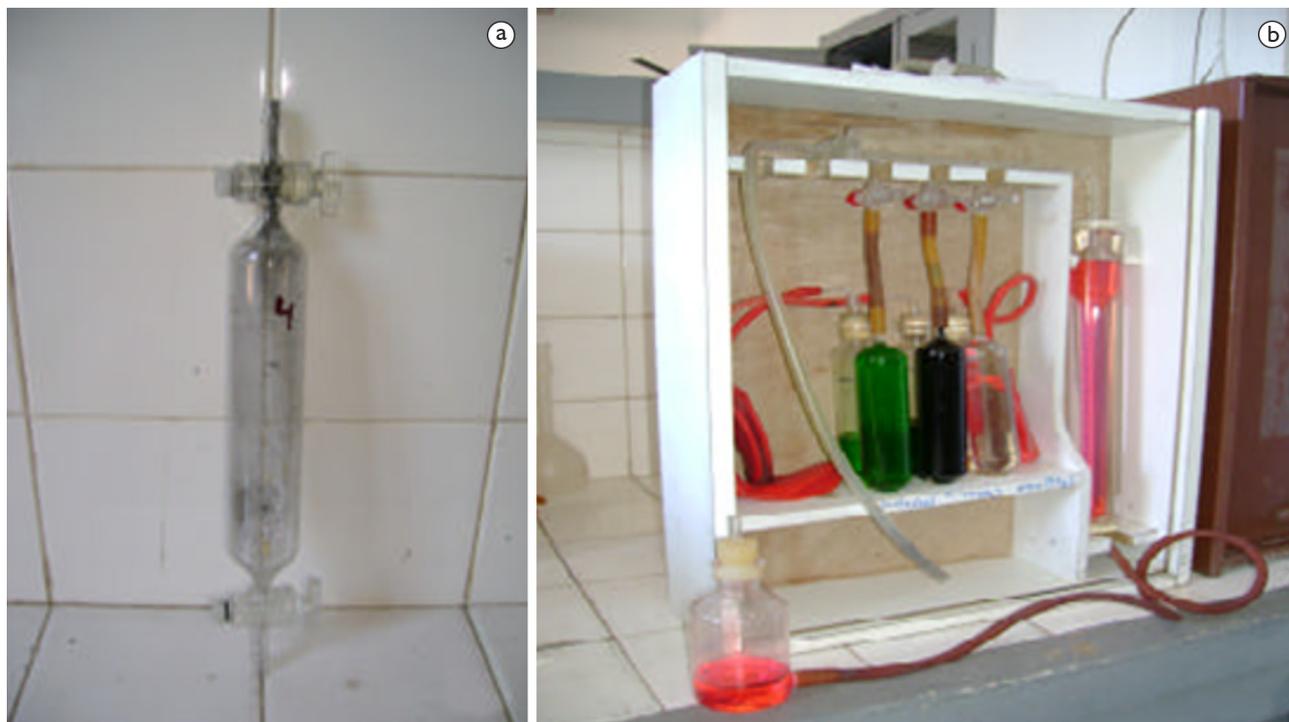


Figura 2. Ampola de vidro para coleta de gás (a) e analisador de gás ORSAT (b).

A análise feita no ORSAT tem limitações quanto à incerteza, repetitividade e reprodutibilidade. Os erros são causados pela maneira da execução, temperatura de amostragem do gás (variações de 1°C geram erros de 1%), tempo de absorção insuficiente, tempo de drenagem da amostra insuficiente, vazamentos nas válvulas dos reagentes e saturação dos reagentes. O desvio padrão é de aproximadamente 0,2mL [18]. A cromatografia possui um tempo de resposta menor e uma maior eficiência nos resultados com desvio padrão relativo de 1 a 2% [19], porém, foi utilizado o analisador de gás ORSAT para fazer a análise dos gases de combustão devido à facilidade do manuseio e do equipamento já se encontrar no laboratório de metalurgia da UFOP ao lado do Simulador de Injeção de Materiais Pulverizados em Altos-Fornos, na qual os erros eram minimizados em relação à temperatura e também devido ao curto tempo na qual a amostra ficaria estocada na ampola, pois as análises foram feitas logo após a coleta do gás. Foram feitas 5 replicatas para as misturas de carvão mineral e casca de eucalipto e também para 100% de carvão mineral e 100% de casca de eucalipto. Para o procedimento da análise do gás foi utilizado a norma CETESB E17.010. Os resultados das amostras variaram de 0,7 a 1,0%, na qual foram feitas uma média dos valores encontrados para calcular a taxa de combustão.

Após a análise, o cálculo da taxa de combustão foi feito pela Equação 1:

$$TC = K * \left(\frac{\%CO + \%CO_2}{\%CH_4 * n_g} \right) * n / \left[\frac{(m_a * \%C_f / 12000) -}{(\%CH_4 * n_g)} \right] \quad (1)$$

Em que:

- TC = Taxa de combustão (combustibilidade);
- K = Constante em função das condições do ensaio;
- %CO, %CO₂, %CH₄ = Porcentagens dos gases produzidos;
- %C_f = Carbono fixo contido na amostra;
- n_g = Número de mols do gás depois da experiência;
- m_a = Massa da amostra de carbono injetada em miligramas.

3 RESULTADOS

Os materiais voláteis são substâncias formadas pelos elementos químicos carbono, hidrogênio e oxigênio. Após a pirólise (endotérmica) do carvão liberam gases combustíveis e incombustíveis. Na Tabela 1 observa-se que o material volátil da casca de eucalipto é 4,72 vezes maior que a do carvão mineral.

O carbono é um gerador de calor e participa indiretamente da redução da carga metálica. Geralmente quando o teor de carbono aumenta, aumenta a taxa de substituição e aumenta, também, a taxa de combustão. As necessidades de enriquecimento em oxigênio para manter a temperatura na zona de combustão diminuem quanto maior for o teor de carbono [20,21]. Observa-se na Tabela 1 que o carbono fixo do carvão mineral é 4,47 vezes maior que da casca de eucalipto e o carbono elementar do carvão mineral é 1,65 vezes maior que da casca de eucalipto.

O hidrogênio é um gerador de calor com menor potencialidade que o carbono. O aumento do teor de hidrogênio dentro do alto-forno reduz a queda de pressão na rampa, a redução do FeO é menos endotérmica que a do

carbono, com maior velocidade e em menor temperatura. Isso implica que pode ser utilizada menor temperatura de chama no alto-forno. Um ponto negativo é que altos teores de hidrogênio podem levar a grande quantidade de finos de coque na cuba do alto-forno [20,21]. A Tabela I mostra que a casca de eucalipto possui um pouco mais de hidrogênio que o carvão mineral.

O aumento do teor de cinzas irá aumentar o volume da escória e aumentar o consumo de calor no alto-forno e, também, leva a um aumento no consumo de carbono, o que reduz a taxa de substituição, aumenta as necessidades de fluxantes e, conseqüentemente, diminui a produção [20,21]. Teores de cinza abaixo de 18% são aceitáveis. De acordo com a Tabela I, os dois materiais apresentam teores menores. É importante lembrar que esses materiais podem ser misturados diminuindo o teor de cinza médio injetados no alto-forno, prática esta já usada nas siderúrgicas, com intuito, também, de diminuição de custo [8].

O enxofre (S) do combustível quando incorporado no ferro-gusa necessitará de dessulfuração posterior, na fabricação do aço. Para diminuir o teor de enxofre no ferro-gusa utiliza-se aumentar o volume da escória e sua basicidade, aumentando o custo de produção do alto-forno. O limite desejável para enxofre é de 0,8% total nas matérias-primas [20,21]. A Tabela I apresenta o teor de enxofre do carvão mineral e da casca de eucalipto menor que este limite.

O oxigênio (O) participa da combustão do carbono, hidrogênio e hidrocarbonetos existente no material pulverizado injetado no alto-forno. Sua presença é importantíssima para o aumento da taxa de injeção no alto-forno e diminuição da

variação de pressão interna do alto-forno. Desta forma, o oxigênio existente nos materiais reagirá com as substâncias oxidáveis no momento da queima, economizando oxigênio a ser injetado pelas ventaneiras. É importante salientar que isso ocorre quando o oxigênio encontra-se puro (O_2). Na tabela I, a casca de eucalipto apresenta teor de oxigênio 12,28 vezes maior que o de carvão mineral.

Geralmente, a taxa de substituição aumenta quanto maior o poder calorífico dos carvões injetados. Carvões com alto poder calorífico aumentam o fluxo de calor na zona de combustão e, conseqüentemente, a temperatura de chama [21]. Através da Tabela I verifica-se, também, que o maior poder calorífico superior (PCS) é do carvão mineral.

Utilizando o simulador de injeção de materiais pulverizado em alto-forno, mostrado na Figura 1, foi possível gerar a Tabela 2, onde encontra valores de taxa de injeção, mistura dos materiais e taxa de combustão.

4 DISCUSSÃO

A partir dos dados obtidos na Tabela 2, foi confeccionado um gráfico mostrado na Figura 3 na qual se observa que o aumento da taxa de injeção provoca uma diminuição da taxa de combustão de todos os materiais analisados. Isto é influenciado principalmente pelo baixo tempo de residência da partícula injetado na zona de combustão ($=0,02s$ a $0,05s$), diminuindo o contato entre partícula e oxigênio e pela relação oxigênio/carbono que diminuirá com o aumento da taxa de injeção prejudicando a eficiência de combustão da partícula [5,22,23]. Os fenômenos dessa etapa

Tabela I. Resultados referentes às análises de poder calorífico, superfície específica, análise química elementar e imediata

Análises		Carvão mineral	Casca de eucalipto
Elementar	Carbono [%]	80,60	48,9
	Hidrogênio [%]	3,85	5,29
	*Oxigênio [%]	3,34	41,02
	Nitrogênio [%]	1,81	0,47
	Enxofre [%]	0,30	0,25
Imediata	Cinzas [%]	10,10	4,07
	Materiais Voláteis [%]	16,87	79,60
	Carbono fixo [%]	73,04	16,32
Poder Calorífico Superior [kcal/kg]		7442	4206

*Oxigênio calculado por diferença.

Tabela 2. Resultados da taxa de combustão para carvão mineral, casca de eucalipto e suas misturas

MATERIAIS	MISTURAS (%)	TAXA DE INJEÇÃO (kg/t gusa)		
		50	100	150
		TAXA DE COMBUSTÃO (%)		
CASCA DE EUCALIPTO	25	88,4	85,6	71,2
	50	89,7	88,1	74,5
	75	90,8	88,5	78,1
	100	89,5	87,3	76,7
CARVÃO MINERAL	100	85,9	83,3	71,2

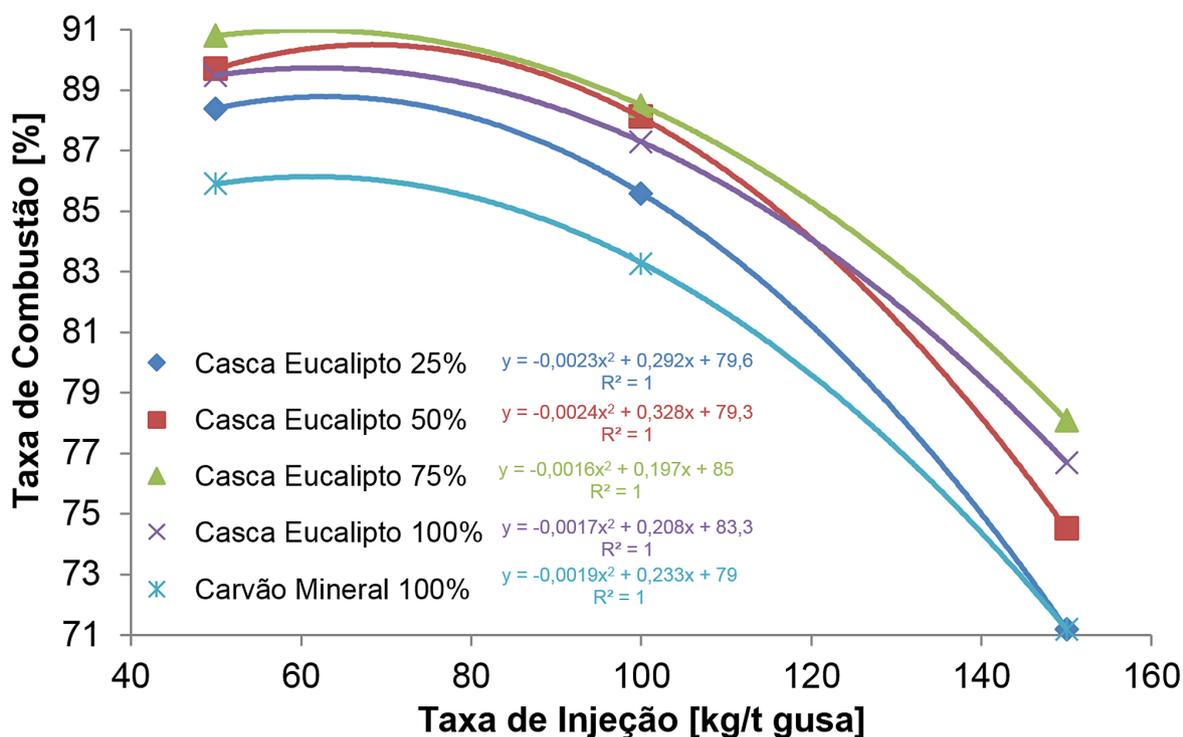


Figura 3. Relação entre taxa de injeção e taxa de combustão, para mistura entre casca de eucalipto e carvão mineral, granulometria entre 200# e 100#.

podem ser descrito da seguinte forma; o aquecimento da partícula é por troca de calor convectivo com o ar do sopro radiante com a zona de combustão, até que se iniciem as reações da partícula, que são desvolatilização e as reações heterogêneas, que contribuirão para a troca de calor da partícula. A desvolatilização é a pirólise da molécula de carvão, que é quando ocorre a vaporização da matéria volátil de alto teor de hidrogênio e se inicia a fragmentação das partículas sólidas [5,24-26].

Comparando os materiais puros (100%), carvão mineral e casca de eucalipto, a Figura 3 apresenta taxa de combustão maior para casca de eucalipto, para todos os valores analisados. Isso pode ser explicado pelo maior teor de materiais voláteis, apresentado na casca de eucalipto. Os voláteis aumentam a reatividade dos materiais, melhorando a combustibilidade dos mesmos, pois eles queimarão primeiramente que o carbono fixo [27].

Isso pode ser visto também nas misturas, ou seja, quanto maior a quantidade de casca de eucalipto na mistura com carvão mineral, maior será a taxa de combustão, para cada taxa de injeção específica (50, 100 e 150 kg / t gusa). A mistura de 75% de casca de eucalipto e 25% de carvão mineral apresentou a melhor taxa de combustão para as taxas de injeção estudada. Assim, pode-se dizer que existe

uma simbiose entre a pirólise e a combustão de materiais voláteis de ambos os materiais.

5 CONCLUSÃO

Os resultados analisados mostram que a casca de eucalipto pode ser usada na injeção de finos pelas ventaneiras do alto-forno. A taxa de combustão foi melhor para a mistura de 75% de casca de eucalipto e 25% de carvão mineral. No caso ambiental, a casca de eucalipto, através do plantio de eucalipto, pode absorver CO_2 da atmosfera através da fotossíntese. Com isso, reduzindo as emissões de gases do alto-forno através do equilíbrio de gases do efeito estufa.

Agradecimentos

Os autores deste artigo gostariam de agradecer ao Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas pela análise elementar, a EcoEnviroX por apoiar o desenvolvimento deste estudo, ao CEFET-MG e a UFOP pelo apoio incondicional à inovação. A Fundação Gorceix, FAPEMIG e CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Caracterização do uso da energia no setor siderúrgico brasileiro. Rio de Janeiro; 2009. 89 p.

- 2 Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE. Estudo prospectivo do setor siderúrgico (2010-2025). Brasília; 2009. 36 p.
- 3 Instituto Aço Brasil. Relatório de Sustentabilidade 2012: concepção AMCE Negócios Sustentáveis. Brasília; 2012. 93 p.
- 4 Silveira RC, Campos VF. Uso de finos de carvão vegetal. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. 1977;33(273):497-501.
- 5 Assis PS, Martins BM, Vieira CB. Curso de injeção de materiais pulverizados em altos-fornos. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Minas; 2009.
- 6 Oliveira RS. Efeito da Injeção de Combustíveis Auxiliares Sobre os Parâmetros Operacionais em Altos-Fornos [monografia]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2014.
- 7 Assis PS, Martins WB, Vieira CB. Avanços na injeção de carvão pulverizado para a sua aplicação em altos-fornos. REM: Revista Escola de Minas. 2003;56(4):281-285.
- 8 Oliveira RP, Manetta H, Cruz JG, Maia MES, Gomes DA, Monteiro MR, et al. Operação dos altos-fornos da V&M do Brasil com altas taxas de injeção de carvão pulverizado. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. 2008;5(2):105-110. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.00502008>.
- 9 Yoshida T, Turn SQ, Yors RS, Antal MJ. Banagrass versus eucalyptus wood volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monographs*. 2005;4:1-63.
- 10 British Standards Institution. Standard BS EN 14774-1:2009: solid biofuels: determination of moisture content: oven dry method: total moisture: reference method. London; 2010.
- 11 British Standards Institution. Standard BS EN 14775:2009. Solid biofuels: determination of ash content. London; 2010.
- 12 British Standards Institution. Standard BS EN 15148:2009: Solid biofuels: determination of the content of volatile matter. London; 2010.
- 13 British Standards Institution. Standard BS EN 15104:2011. Solid biofuels: determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen: instrumental methods. London; 2011.
- 14 British Standards Institution. Standard BS EN 15289:2011: solid biofuels: determination of total content of sulfur and chlorine. London; 2011.
- 15 British Standards Institution. Standard EN 14780:2011: solid biofuels: sample preparation: biofuels, solid fuels, biomass, wastes, fuels, specimen preparation, test specimens. London; 2011.
- 16 British Standards Institution. Standard BS EN 14918:2009: solid biofuels: determination of calorific value. London; 2010.
- 17 Oliveira GM, Oliveira VA, Cândido LS, Assis PS. Estudo do fluxo de materiais pulverizados em simulador de injeção de ventaneiras em altos-fornos através de vídeo-fotografia. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. 2007;3(4):7-15. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.00304002>.
- 18 Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. Aparelho ORSAT para análise de gases de combustão: especificação. São Paulo; 1990. p. 1-7.
- 19 Ribani M, Bottoli CBG, Collins CH, Jardim ICSF, Melo LFC. Validação em métodos cromatográficos e eletroforéticos. *Química Nova*. 2004;27(5):771-780. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422004000500017>.
- 20 Gomes MLI. Avaliação da viabilidade técnica da utilização de misturas de carvão faxinal com importados para injeção em alto-forno [dissertação de mestrado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2004.
- 21 Machado JGMS. Estudo da reatividade e combustão de carvões minerais, carvão vegetal e misturas [tese de doutorado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2009.
- 22 Assis PS, Braga RNB, Porto FM. Injeção de carvão vegetal pulverizado em altos-fornos. In: Seminário Sobre Alternativas a Importação de Carvão Metalúrgico para a Siderúrgica Brasileira; 1993; Volta Redonda, Brasil. São Paulo: ABM; 1993. p. 15-29.
- 23 Assis PS, Minelli RF. Injeção de materiais pulverizados em altos-fornos. In: Curso Sobre Alto-forno; 1993; Ouro Preto. Ouro Preto: ABM; 1993.
- 24 Sobrinho PJN. Comportamento de diferentes materiais injetados através das ventaneiras dos altos-fornos [dissertação de mestrado]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 1998.
- 25 Baltazar AWS, Castro JA, Silva AJ. Simulação da combustão de carvão pulverizado em reator tubular nas condições das ventaneiras do alto-forno. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. 2006;2(4):7-12. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.00204002>.
- 26 Silva AM. Estudo da Combustão de Carvões e Misturas com o Coque Verde de Petróleo injetados em altos-fornos [dissertação de mestrado]. São Paulo: Universidade Estadual Paulista; 2006.
- 27 Assis CFC, Tenório JAS, Assis PS, Nath NK. Experimental simulation and analysis of agricultural waste injection as an alternative fuel for a blast furnace. *Energy & Fuels*. 2014;28(11):7268-7273. <http://dx.doi.org/10.1021/ef501236g>.

Recebido em: 5 Set. 2015

Aceito em: 28 Out. 2015